

## 3 Chránění generátorů

### 3.1 Druhy generátorových ochran (4)

Synchronní generátor se vybavuje souborem ochran, které mají za úkol alternátor buď odstavit (při poruchách, které mohou ohrozit stroj nebo stabilitu ES), nebo jen signalizovat poruchu (např. zemní ochrana rotoru).

Ochrany generátoru rozdělujeme:

#### a) ochrany vyhodnocující zkraty a zemní spojení:

- vnitřní zkrat mezi fázemi
- vnější zkrat mezi fázemi
- závitový zkrat na statoru nebo rotoru
- zemní spojení statoru
- zemní spojení rotoru

#### b) ochrany vyhodnocující abnormální provozní stavy:

- přetížení
- přepětí, podpětí
- zpětný tok výkonu ( motorický chod )
- nesymetrické zatížení fází
- ztráta buzení
- podsynchronní a nadsynchronní otáčky
- ložiskové proudy
- ochrana proti samobuzení

### Ochrany zachycující zkraty a zemní spojení

Pokud dojde ke zkratu, ne zemnímu spojení na statoru nebo rotoru, jedná se vždy o velmi závažnou poruchu, která vyžaduje odstavení elektrického stroje z provozu.

#### Rozdílová ochrana

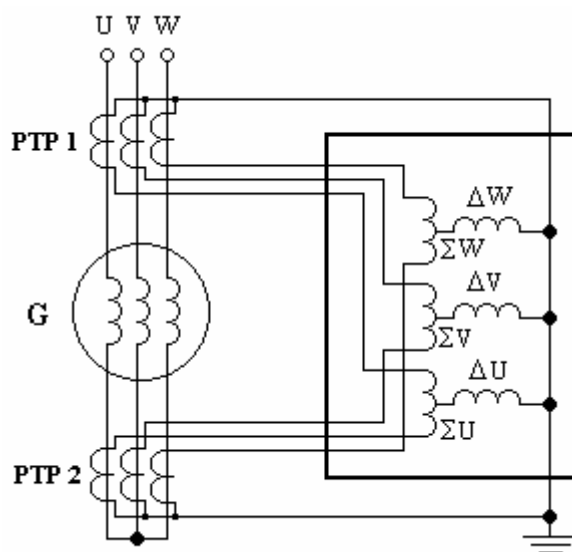
Je spolehlivou ochranou pro zachycení vnitřních zkratů.

- a) Podélná rozdílová ochrana - porovnává proudy vstupní a výstupní chráněného objektu.
- b) Oblast, kterou chrání je tedy vymezena PTP- PTP 1 a PTP 2, na které je připojena- obr.3.1.

Za normálního provozu, jsou proudy na vstupu (svorkách) i výstupu (v uzlu) alternátoru stejné. Při vhodně zvolených převodech jsou stejné i proudy sekundární. Rozdílový proud  $\Delta I = 0$ . Dojde-li k poruše uvnitř chráněného objektu, dojde k nerovnováze proudů a rozdílový proud tekoucí měřicím členem způsobí jeho náběh a koncový člen ochrany působí na

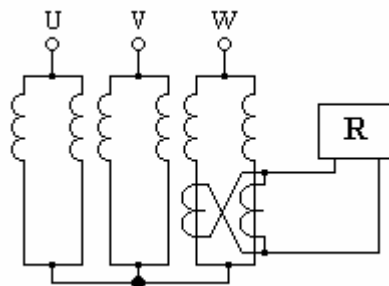
vypínač, který má provést vypnutí- odpojení alternátoru (objektu) od sítě. V praxi se tato ochrana používá k chránění buď samotného alternátoru, popřípadě transformátoru, nebo také bloku alternátoru + transformátor.

U alternátoru se nastavuje rozdíl proudu (rozběhová hodnota) na  $(10 - 30)\%I_n$  - jmenovitého proudu na sekundární straně přístrojových transformátorů proudu. Pokud chráníme blok alternátor+transformátor nastavuje se hodnota  $\Delta I$  na  $(20 - 50)\%I_n$ . Ochrana musí působit mžikově a vypíná celou soustavu (výkonový vypínač, uzavírá přívod páry, odbuzuje alternátor). Při vnějším zkratu se může vlivem nesouměrnosti přístrojových transformátorů proudu vyvolat tak velký rozběhový proud ochrany, že by mohla reagovat chybně. Z tohoto důvodu je ochrana vybavená kompenzačním článkem, který blokuje ochranu, pokud porucha není uvnitř chráněného objektu.



Obr.3.1. Zapojení podélné rozdílové ochrany k chráněnému alternátoru.

**b) Příčná rozdílová ochrana** - srovnává proudy dvou shodných objektů, které pracují paralelně při shodných podmínkách. Mohou to být paralelní vedení, dva stejné transformátory v paralelním provozu, paralelní větve satorového vinutí synchronního generátoru, jsou-li vyvedeny uzly paralelních větví vinutí apod. Princip zapojení je na obr. 3.2.

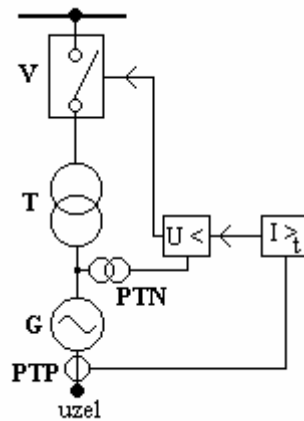


Obr. 3.2. Zapojení příčné rozdílové ochrany jako závitové ochrany satorového vinutí alternátoru s vyvedenými paralelními větvemi satoru.

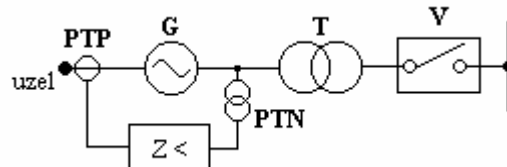
### Nadproudová zkratová ochrana

Je určena pro ochranu alternátorů proti vnějším zkratům tj. mimo vinutí stroje, zároveň plní funkci záložní ochrany rozdílové ochraně při vnitřních zkratech. Používá se nadproudová zkratová ochrana časově zpožděná - nezávislá, která je současně blokována podpět'ovým článkem- obr.3.3.

Princip: dojde-li ke zkratu mimo vinutí stroje, dojde ke zvýšení proudu, sepne nadproudový článek a současně spustí časový stroj. Pokud je zkrat blízko stroje, dojde k poklesu napětí a zareaguje také podpět'ový článek . Při reakci obou článků a po uplynutí nastavené časové prodlevy dojde k vypnutí hlavního vypínače. Pokud nedojde k poklesu napětí, znamená to, že došlo k přetížení, nebo zkrat je vzdálený. V tomto případě ochrana nereaguje. Nevýhodou je zpožděné vypínání, způsobené nastaveným časem, tak aby byla zajištěna selektivita ochran. Tuto nevýhodu je možné odstranit použitím impedanční ochrany alternátoru ve funkci zkratové ochrany- obr.3.4.



Obr. 3.3 Nadproudová zkratová ochrana blokována podpětím

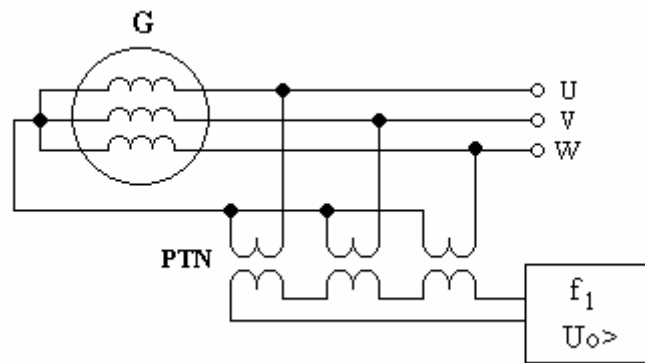


Obr. 3.4 Připojení distanční ochrany ve funkci zkratové ochrany k alternátoru.

### Ochrana vyhodnocující závitový zkrat v jedné fázi

Při závitovém zkratu prochází částí vinutí statoru poměrně velký proud, neboť impedance statorových tyčí jsou malé. Závitový zkrat způsobí nevyvážení svorkového napětí stroje. To znamená že se objeví nulová složka  $u_0$  trojfázového napětí na svorkách. Na zjišťování nulové složky napětí je založen princip závitové ochrany. Uzel hvězdy vstupního vinutí PTN na svorkách generátoru je spojen s uzlem generátoru. Na otevřeném trojúhelníku výstupního PTN se při poruše vytvoří napětí  $3u_0$ .

Protože zde působí rušivé vlivy napětí harmonických násobků tří, je vhodné užít frekvenčně závislou napět'ovou ochranu na první harmonickou- obr. 3.5.

Obr. 3.5 Závitová ochrana alternátoru s měřením nulové složky napětí  $u_0$ .

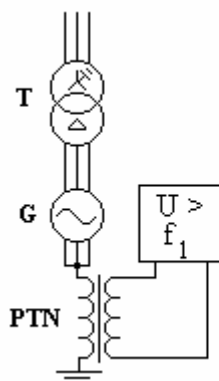
V případě, že má alternátor vyvedeny uzly paralelních větví fází statoru, může se použít také příčná rozdílová ochrana- viz obr.3.2.

### Zemní ochrana statoru alternátoru

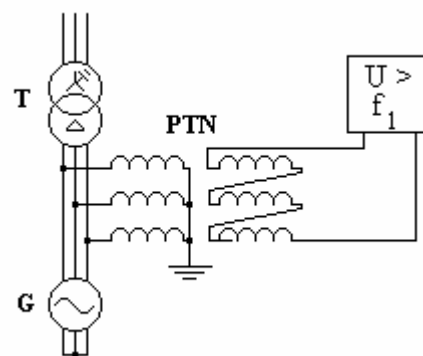
Pokud dojde k zemnímu spojení statoru, dochází k posunu nulového bodu. Na uzlu generátoru vznikne proti zemi určité napětí, jehož velikost je ovlivněna místem zemního spojení. Toto napětí je využíváno k funkci zemní ochrany. V praxi se využívají dvě provedení:

- alternátor pracuje v bloku s transformátorem
- alternátor je připojen přímo na generátorové přípojnice a jejich prostřednictvím přímo do nekompensované či kompenzované sítě vysokého napětí.

ad a ) v tomto případě je možno použít napětěovou kmitočtově závislou ochranu- obr.3.6. Ochrana indikuje zemní spojení v rozsahu 0 až 95% vinutí statoru alternátoru.



Obr. 3.6



Obr. 3.7

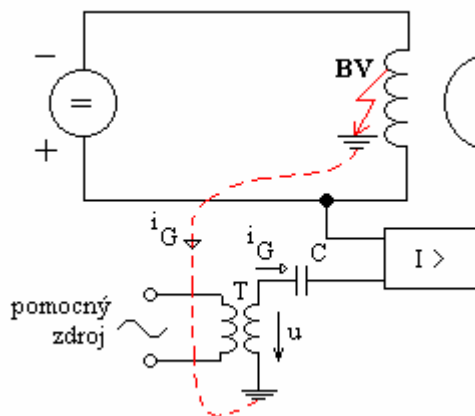
Zemní ochrana na první harmonickou statoru alternátoru, který pracuje v bloku s transformátorem a má připojen PTN - v uzlu stroje obr. 3.6, - na svorkách stroje obr. 3.7.

Jestliže máme izolovanou soustavu ( uzel generátoru je izolován ), potom musíme vyrobit tzv. umělý uzel. Primární vinutí přístrojových transformátorů v uzlu uzemníme a sekundární zapojíme do otevřeného trojúhelníka. Na sekundární straně změříme napětí  $3U_0$ . Tato ochrana by měla být doplněna frekvenčním filtrem, který propustí pouze 1 harmonickou - obr.3.7.

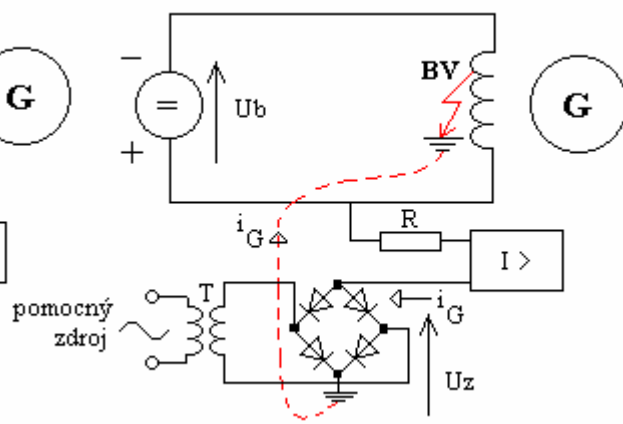
**ad b)** Pokud instalujeme tuto ochranu musíme určit velikost kapacitního proudu chráněného alternátoru a připojené sítě. Je-li kapacitní proud sítě podstatně větší než kapacitní proud alternátoru pracuje ochrana následovně: při zemním spojení ve stroji jde netočivá složka kapacitního proudu sítě do stroje, při zemním spojení v síti jde ze stroje netočivá složka kapacitního proudu do sítě. Rozběhový proud ochrany se nastavuje mezi tyto dvě hodnoty. Při zemním spojení uvnitř stroje je ochrana vybavena kapacitním proudem sítě, při zemní spojení mimo stroj ochrana nepůsobí. Je-li kapacitní proud sítě stejný jako kapacitní proud alternátoru nelze podle velikosti zemního proudu určit místo poruchy. Ochrana musí být vybavena prvkem, který určuje směr toku jalového výkonu.

### Zemní ochrana rotoru alternátoru

Princip používané ochrany spočívá v tom, že při poškození izolace budícího vinutí (zemní spojení na rotoru) se propojí proudový obvod ochrany. Této ochrany lze užít ve dvou variantách a to ve střídavé (obr. 3.8) a stejnosměrné (obr. 3.9.) superpozici.



Obr. 3.8 Střídavá superpozice.



Obr. 3.9 Stejnosměrná superpozice.

Tato ochrana neodstavuje alternátor, pouze signalizuje poruchu. Příslušné odstavení provede obsluha stroje.

Ochrana při druhém zemním spojení zásadně neprojektujeme ani nepoužíváme.

I seberychlejší taková ochrana není nic platná. Než dojde k odbuzení stroje a doznění magnetických polí (jejich doba je dána časovou konstantou  $\tau_a = L/R$  rotoru), mohou vzniklé radiální síly rotoru způsobit velmi těžkou havárii. Proto je nutné při prvním zemním spojení stroj odstavit a opravit.

### Ochrany zachycující abnormální provozní stavy

#### Ochrana proti proudovému přetížení

Stroj je konstruován tak, aby byl bezpečně chlazen a teplo vzniklé ztrátami bylo odvedeno. Jestliže alternátor dodává větší proud než  $I_n$ , pak mluvíme o stavu přetížení. Vlivem přetížení dochází k nežádoucí akumulaci tepla ve vinutí. Takováto nežádoucí teplota má za následek

urychlení stárnutí izolace a při velkém oteplení může dojít k poškození izolace nebo dokonce ke zkratu. Krátkodobé přetížení snášejí alternátory poměrně snadno, proto je přetížení pouze signalizováno obsluha a ta má odlehčit alternátor. Používají se ochrany s nastavení 1,1 až 1,3  $I_n$ . U strojů, které pracují s proměnlivým zatížením, se dělá tzv. tepelný obraz stroje (termoskopie). Používá se termistoru, který je ochlazován stejným médiem jako chráněný stroj.

### **Ochrana proti nadpětí**

Chrání alternátor i blokový transformátor při náhlém odlehčení jalové zátěže, při selhání regulátoru napětí a při protočení turbíny před napěťovými rázy. Ochrana se připojuje ke sdruženým napětím přístrojovými transformátory napětí jako dvojstupňová. Používáme jiné transformátory napětí, než ke kterému je připojen regulátor buzení, jinak by v případě selhání těchto transformátorů neexistovala vzájemná záloha obou přístrojů.

### **Ochrana proti ztrátě buzení**

Při podbuzení dojde u strojů s vyniklými póly k zániku synchronismu. Stroj přejde do asynchronního chodu, jeho otáčky poněkud stoupnou a přenášený střední výkon se nezmění. Jako ochrana proti ztrátě buzení je vhodná 1systémová impedanční offset-mho charakteristika impedanční ochrany, která působí při změně jmenovité impedance. Ochrana při ztrátě buzení nevypíná stroj, ale působí na automatiku při ztrátě buzení. Ta umožňuje provoz stroje v asynchronním chodu při zmenšeném předávaném výkonu. Odvozuje dobu působení podle nastavené charakteristiky v závislosti na velikosti výkonu.

### **Ochrana proti zpětnému výkonu**

Tato ochrana má zamezit motorickému chodu alternátoru při poruše na turbíně. Používá se ochrana wattová, měřící činný výkon jdoucí ze sítě do alternátoru při motorickém chodu. Připojuje se buď na fázový proud a příslušné fázové napětí, nebo na sdružené napětí protějších fází. Používá se ochrana časově zpožděná, aby se vyloučilo působení ochrany při kolísání výkonu.

### **Ochrana proti nesymetrickému zatížení**

Zpětná složka proudu, která vzniká při nesymetrickém zatížení synchronního generátoru, vytváří v statoru alternátoru zpětné magnetické pole. Vlivem tohoto magnetického pole se v rotoru indukují vířivé proudy, které jsou tím větší, čím větší je nesymetrie zatížení. Tyto vířivé proudy způsobují nežádoucí oteplení stroje. Ochrana proti nesymetrickému zatížení měří hodnotu zpětné složky proudu a podle její velikosti se určí dovolená doba nesymetrického zatížení. Při nastavování jednotlivých stupňů ochrany se musí vycházet z údajů od výrobce.

### **Ochrana proti ložiskovým proudům**

Vlivem magnetické nesouměrnosti stroje může vzniknout napětí mezi hřídeli rotoru a státorem. U moderních strojů jsou ložiskové pánve izolované. V případě porušení izolace dojde k průchodu proudu, který poškozuje ložiska. Tuto ochranu lze realizovat pomocí průvlekového transformátoru proudu umístěného na hřídeli stroje.

**Ochrana proti samobuzení**

K samobuzení může dojít, jestliže je generátorem napájena velká kapacitní zátěž např. dlouhé vedení naprázdno. To má za následek zvyšování svorkového napětí stroje. Ochrana je postavena na principu přepět'ového článku, který je blokován minimálním proudem buzení.

**Přehled ochran generátorů podle ČSN 33 30 51**

Podle normy ČSN 33 30 51 *Ochrana elektrických strojů a rozvodných zařízení*, rozdělujeme použití ochran generátorů podle velikosti jejich zdánlivých výkonů  $S$  (MVA).

Turboalternátory a alternátory zdrojových soustrojí se vybavují ochranami podle tabulky 3.1.

Tab. 3.1: Přehled ochran turboalternátorů a alternátorů zdrojových soustrojí.

Druh ochrany	Výkon synchronního generátoru S [MVA]					
	S < 1	1 < S < 5	5 < S < 10	10 < S < 50	50 < S < 200	200 < S
Nadproudová zkratová časově nezávislá	X <sup>(11)</sup>	X <sup>(11)</sup>	X <sup>(11)</sup>	X <sup>(1)10)</sup>	X <sup>(1)10)</sup>	X <sup>(1)10)</sup>
Zkratová podimpedanční				X <sup>(1)</sup>	X	X
Přetížení statoru	(X)	X	X	X	X	X
Rozdílová		X	X	X	X	X
Nadpětová <sup>2)</sup>	(X)	X	X	X	X	X
Zemní statoru		X	X	X	X <sup>(3)</sup>	X <sup>(3)</sup>
Zemní rotoru		X	X	X	X	X
Závitová <sup>4)</sup>				(X)	(X)	X
Zpětná wattová <sup>5)</sup>		X	X	X	X	X <sup>(6)</sup>
Nesouměrné zatížení				X	X	X
Při ztrátě buzení <sup>7)</sup>					X	X
Při podbuzení					X	X
Přetížení rotoru					(X)	X
Ložisková <sup>8)</sup>						X
Prokluz rotoru						X <sup>(1)</sup>
Proti ztrátě stability						X <sup>(1)</sup>
Podkmitočtová			(X) <sup>(9)</sup>	(X) <sup>(9)</sup>	(X)	X
Nadkmitočtová						X
Při přesycení <sup>8)</sup>					(X)	(X)
Proti asynchr. chodu						(X)
Při poklesu napětí a kmitočtu v ES					(X)	(X)

X - ochrana se použije (X) - ochrana se doporučuje

**Vysvětlivky k tabulce 3.1:**

- 1) Podle provozních podmínek se použije jedna nebo druhá ochrana.
- 2) Ochrana dvoustupňová nebo časově nezávislá.
- 3) Ochrana musí chránit 100% délky vinutí.
- 4) Ochrana se použije, má-li vinutí statoru paralelní větve.
- 5) Ochrana se použije u protitlakých soustrojí, pracujících s protitlakem 0,8 MPa a vyšším, pokud součin výkonu (MW) a otáček (1/min) je 18 000 a vyšší; u kondenzačních soustrojí a ostatních protitlakových soustrojí při jmenovitém výkonu 12 MW a vyšším, nebo je-li



zpětná wattová ochrana předepsána výrobcem turbíny. Ve všech případech musí být blokován vypínací impuls této ochrany ochranami turbíny.

- 6) Použijí se dvě ochrany.
- 7) Pokud výrobce alternátoru dovoluje, aby alternátor pracoval krátkodobě v asynchronním chodu, doplní se ochrana automatikou, která sníží zatížení alternátoru na hodnotu povolenou při asynchronním chodu.
- 8) Po dohodě s výrobcem stroje.
- 9) U dieselgenerátorů.
- 10) Ochrana je s odblokováním při podpětí.
- 11) Ochrana může být s odblokováním při podpětí.

Alternátory elektrických zdrojových soustrojí v jaderných elektrárnách, sloužící pouze pro napájení systému vlastní spotřeby bezpečnostních technologických systémů, se nevybavují zemní ochranou rotoru a nadpět'ovou ochranou pro odstavení alternátoru. V těchto případech jsou výstupy ochrany pouze signalizovány. V ostatních případech se doporučuje použít ochranu při poklesu kmitočtu.

#### **Pravidla pro chránění synchronních generátorů – vyplývající z tabulky 3.1.:**

Nadproudová zkratová časově nezávislá ochrana se použije u strojů do 10 MVA s možností kombinace odblokování při podpětí, u strojů s výkonem od 10 do 50 MVA je možné podle provozních podmínek zvolit místo této ochrany ochranu zkratovou podimpedanční, u strojů s vyšším výkonem se doporučuje její použití a v případě jejího použití je nutné tyto odblokovat při podpětí.

Zkratová podimpedanční ochrana se používá u strojů s výkonem nad 50 MVA vždy, u jiných strojů s menším výkonem nadproudová zkratová ochrana viz odstavec výše.

Ochrana proti přetížení statoru se doporučuje u strojů do 1 MVA, u strojů s vyšším výkonem, se použije vždy.

Nadpět'ová ochrana časově nezávislá nebo dvoustupňová se použije u strojů nad 1 MVA vždy, u strojů s menším výkonem dle provozních podmínek.

Zemní ochrana statoru se použije u strojů nad 1 MVA, u strojů nad 50 MVA musí ochrana chránit 100% délky vinutí statoru stroje.

Zemní ochrana rotoru se použije u strojů nad 1 MVA. Závitová ochrana se použije tehdy, má-li vinutí statoru paralelní větve a to u strojů pouze nad 10 MVA.

Zpětná wattová ochrana se použije u strojů s výkonem větším než 1 MVA přičemž u strojů s výkonem větším než 200 MVA se použijí dvě ochrany.

Nesouměrné zatížení je chráněno u strojů s výkonem vyšším než 10 MVA.

Ochrana při ztrátě buzení se použije u strojů nad 50 MVA. Pokud výrobce alternátoru dovoluje, aby alternátor pracoval krátkodobě v asynchronním chodu, doplní se ochrana automatikou, která sníží zatížení alternátoru na hodnotu povolenou při asynchronním chodu.

Ochrana při podbuzení se použije u strojů s výkonem nad 50 MVA.

Ochrana přetížení rotoru se použije u strojů nad 200 MVA vždy, u strojů s výkonem nad 50 MVA se doporučuje její použití.

Ochrana prokluzu rotoru a ochrana proti ztrátě stability se použije podle provozních podmínek buď jedna nebo druhá, a to u strojů s výkonem nad 200 MVA.

Ochrana podkmitočtová se doporučuje u dieselgenerátorů s výkonem od 5 do 50 MVA, doporučuje se i pro stroje s výkony od 50 do 200 MVA. Pro generátory nad 200 MVA se použije vždy.

Ochrana nadkmitočtová se použije pouze u strojů nad 200 MVA.

Ochrana při přesycení a ochrana při poklesu napětí a kmitočtu v ES se doporučuje u strojů s výkonem nad 50 MVA, ochrana při přesycení po dohodě s výrobcem strojů. Ochrana proti asynchronnímu chodu soustavy se doporučuje u strojů s výkonem nad 200 MVA.

### 3.2 Simulace vybraných stavů generátoru, testování generátorové ochrany SPAG332C



Jako komplet generátorových číslicových ochran byl pro testování vybrán soubor generátorových ochran SPAG332.

Soubor ochran generátoru SPAG332 je určen pro chránění generátorů a jejich hnacích mechanických jednotek (strojů).

Chránění hnací mechanické jednotky (stroje) zajišťuje zpětná wattová ochrana, která brání motorickému chodu soustrojí. Chránění generátoru zajišťují přepětová ochrana, zkratová ochrana a ochrana vyhodnocující zemní poruchu statoru.

Přepětová ochrana je ochranou dvoustupňovou. Nadproudový modul s jedním stupněm s nižším rozsahem seřiditelnosti a s druhým stupněm s vyšším rozsahem seřiditelnosti je použit pro zkratové chránění. Dvoustupňový modul směrové proudové ochrany (vyhodnocující nulový proud) je využit jako zemní ochrana. Soubor ochran generátoru obsahuje tři ochranné moduly: kombinovaný modul přepětové a zpětné wattové ochrany SPCP 3C2, který je určen k chránění hnací mechanické jednotky při zpětném toku výkonu a k chránění generátoru při přepětí, modul 3fázové nadproudové ochrany SPCJ 3C3, který je určen pro zkratové chránění a modul směrové proudové ochrany (vyhodnocení nulového proudu) SPCS 3C4, který je určen pro chránění při zemních poruchách statoru stroje.

Přepětová ochrana má dva stupně  $U>$  a  $U>>$ . Jestliže napětí překročí nastavenou hodnotu stupně  $U>$ , dojde k popudu stupně s nižším rozsahem seřiditelnosti a je aktivován provozní indikátor působení  $U>$  (svítí žlutým světlem). Po uplynutí přednastaveného času působení je přepětovým stupněm generován ovládací signál na výstupní relé a provozní indikátor působení se rozsvítí červeným světlem. Stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti  $U>>$  pracuje stejným způsobem jako stupeň  $U>$ . Funkce vyhodnocující zpětný tok výkonu měří jednofázově výkon mezi generátorem a sítí. Měření vyhodnocuje fázové proudy fází L1, L2 a

sdružené napětí mezi fázemi L1 a L2. Jestliže je vyhodnocen tok činné složky výkonu ve zpětném směru, tj. ve směru ze sítě do generátoru, je při překročení hodnoty popudové hladiny funkce zpětného výkonu aktivována příslušná funkce a současně je aktivován žlutý provozní indikátor působení. Po uplynutí přednastaveného času působení je modulem generován ovládací signál na výstupní relé a provozní indikátor působení P← se rozsvítí červeným světlem. Kombinovaný modul přepětové a zpětné wattové ochrany indikuje výkon měřený stupněm zpětného výkonu v rozsahu (-25 až +25)% jmenovitého výkonu  $P_N$ .

Jestliže fázový proud překročí nastavenou hodnotu modulu nadproudového stupně s nižším rozsahem seřiditelnosti  $I>$ , dojde k aktivaci odpovídajícího časového členu a provozního indikátoru působení stupně (svítí žlutým světlem). Po uplynutí nastaveného času působení je modulem generován ovládací signál na výstupní relé. Současně se provozní indikátor působení rozsvítí červeným světlem. Stupeň proudového modulu s vyšším rozsahem seřiditelnosti  $I>>$  pracuje stejným způsobem jako stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti  $I>$ .

Ochrana vyhodnocující zemní poruchu má dva stupně  $I\phi>$  a  $I\phi>>$ . Jestliže hodnota nulového napětí překročí nastavenou hodnotu a současně je překročena nastavená hladina hodnoty  $I_0 \times \cos\phi$  nebo hladina hodnoty  $I_0 \times \sin\phi$  u stupně  $I\phi>$  ( $\phi$  je úhel mezi nulovým napětím a nulovým proudem), dojde k popudu stupně a k aktivaci provozního indikátoru působení stupně (svítí žlutým světlem). Po uplynutí nastaveného času působení je stupněm  $I\phi>$  generován ovládací signál na výstupní relé a provozní indikátor působení se rozsvítí červeným světlem. Stupeň modulu směrové proudové ochrany (vyhodnocující nulový proud) s vyšším rozsahem seřiditelnosti  $I\phi>>$  pracuje stejným způsobem jako stupeň  $I\phi>$ .

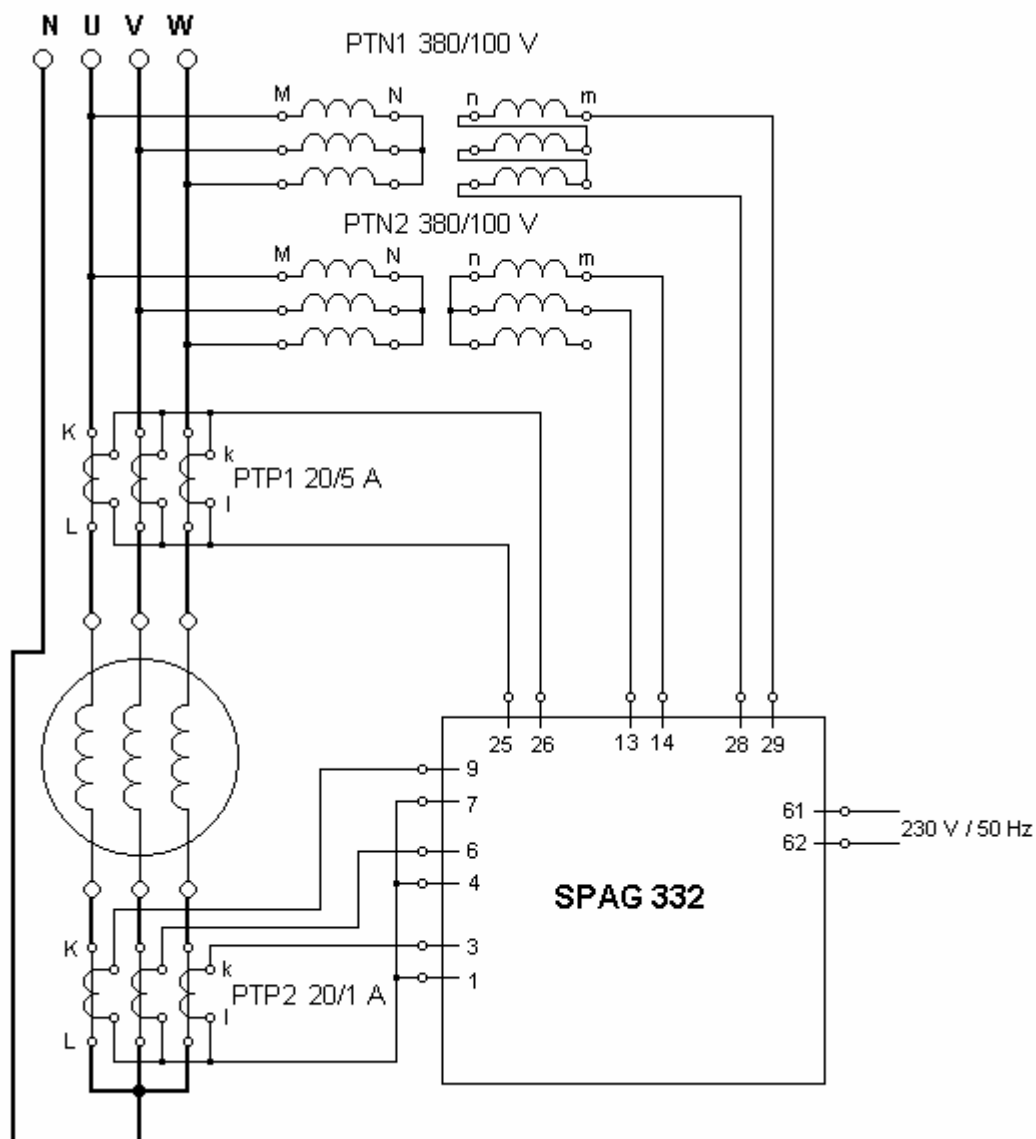
### **3.2.1 Měření napětových a proudových poměrů při přifázování generátoru k síti, testování modulu nadproudové ochrany SPCJ 3C3 a modulu zpětné wattové ochrany SPCP 3C2**

Testování modulu nadproudové ochrany a modulu zpětné wattové ochrany bylo realizováno při simulaci provozních stavů synchronního generátoru s derivačním buzením poháněného přes hřídel stejnosměrným motorem s cizím buzením. Konkrétně se jednalo o měření napětových a proudových poměrů v okamžiku přifázování nabuzeného a roztočeného na synchronní otáčky synchronního generátoru k síti. Výkon jednoho generátoru pracující do společné sítě je zpravidla velmi malý v porovnání se součtem výkonů všech dalších alternátorů napájejících tuto síť. Při jistém zjednodušení je možno předpokládat, že v poměru k výkonu jednoho stroje je součet výkonů všech generátorů, tj. výkon sítě, nekonečně velký. Znamená to, že libovolná změna práce jednoho generátoru nemá vliv na velikost napětí a kmitočet sítě – tyto veličiny jsou konstantně nezávislé na proudu statoru, účinniku, budícím proudu, dalších veličinách a parametrech generátoru. Pokud se synchronní generátor otáčí úhlovou rychlostí a je připojen k síti o nekonečně velkém výkonu, napětí ve všech fázích generátoru jsou stejná jako napětí sítě, jsou však posunuta o  $180^\circ$ . V tomto případě je součet ems v každém obvodu statoru roven nule a vinutím statoru nebude protékat žádný proud. Vzroste-li z jakéhokoliv důvodu moment prvotního motoru (např. turbíny), rotor generátoru je urychlen nad synchronní otáčky a vinutím začne protékat proud, generátor dodává výkon do

sítě. Na hřídeli tak vznikne moment, který bude působit proti dalšímu zrychlování rotoru a způsobí zachování rovnosti kmitočtů sítě a generátoru. V případě, že moment prvotního motoru se zmenší, rotor alternátoru se začne otáčet pomaleji, vznikne rozdíl ems a vinutím statoru začne procházet proud, stroj se začne chovat jako motor a začne odebírat energii ze sítě. Rotor se začne zrychlovat až se opět kmitočty (resp. úhlové rychlosti) generátoru a sítě vyrovnají. Z výše uvedeného vyplývá, že synchronní stroj pracující paralelně se sítí o nekonečně velkém výkonu se snaží sám automaticky udržovat synchronní otáčky. Tato vlastnost stroje je velmi cenná, má však své omezení. Přesáhnou-li momenty, které stroj zrychlují či zpomalují, určité hodnoty, „stroj vypadne ze synchronizmu“, tj. přestane se otáčet synchronně. Pokud je synchronní stroj připojen k síti o nekonečně velkém výkonu a nedodává do ní žádnou energii, tj. pracuje-li naprázdno, napětí stroje je rovno napětí sítě. Pokud dojde ke zvýšení budícího proudu stroje, rozdíl mezi napětím sítě a napětím stroje způsobí rozdíl ems, vinutím statoru začne protékat proud zpožděný za ems úbytku napětí o  $90^\circ$ . Mms tohoto proudu bude působit proti mms budícího vinutí, bude tedy zmenšovat výsledné pole stroje. Opačný jev vznikne při zmenšení budícího proudu. Proud bude v tomto případě předbíhat ems rozdílu napětí o  $90^\circ$  a jeho mms bude stroj přibuzovat. Synchronní stroj pracující paralelně se sítí o nekonečně velkém výkonu, automaticky působí nejen proti zrychlení či zpomalení otáčení rotoru, ale také proti důsledkům změny budícího proudu, neboť jeho svorkové napětí je jednoznačně určeno napětím sítě.

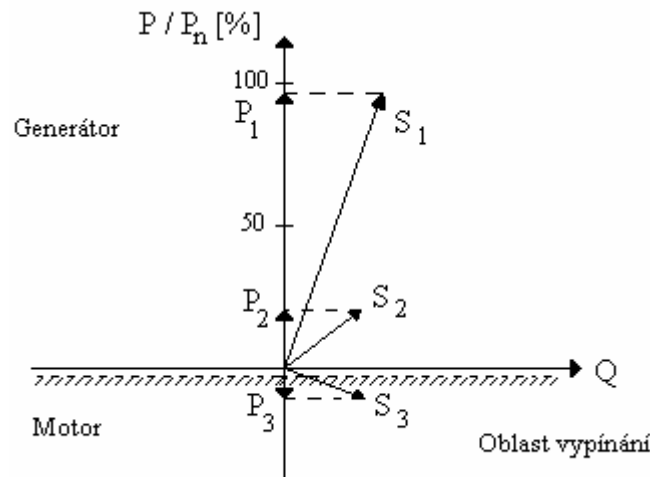
Z hlediska chránění samotného generátoru je nezbytné znát výše zmíněné provozní stavy generátoru při paralelní spolupráci s distribuční sítí. Tyto stavy mohou být charakterizovány závislostí výkonu stroje na zátěžném úhlu, V-křivkami a regulační charakteristikou.

V rámci testování vybraných modulů generátorových ochran byly zkoumány základní stavy provozu synchronního stroje při paralelní spolupráci s distribuční sítí, a to: stav, kdy synchronní stroj pracuje jako přebuzený/podbuzený generátor, přebuzený/podbuzený motor a stav provozu jako kompenzátor. Podrobné vyhodnocení měření je popsáno v příloze P2\_1. V následujícím textu je uveden příklad testování modulu zpětné wattové ochrany SPCP 3C2 pro stav, kdy synchronní stroj pracuje jako podbuzený motor. Schéma zapojení testovaných modulů souboru ochran SPAG323 je zobrazeno na obr. 3.10.



Obr. 3.10 Schéma zapojení testovaných modulů souboru ochran SPAG332C.

Působení modulu zpětné wattové ochrany je zobrazeno na obr. 3.11, kde bod P1 odpovídá oblasti působení pro  $90\%/P_n$ , P2 odpovídá oblasti působení pro  $20\%/P_n$  a P3 oblasti působení v motorickém chodu pro  $-10\%/P_n$ .



Obr. 3.11 Oblast působení modulu zpětné wattové ochrany SPCP 3C2

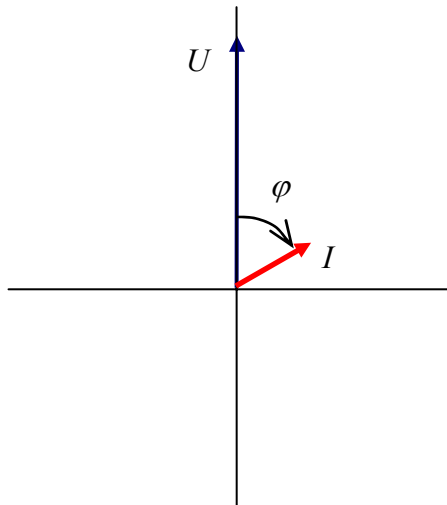
Velikost popudové hodnoty stupně zpětné wattové ochrany je volen s ohledem na možnost její technické realizace, tj. aby bylo možno vytvořit dostatečný zpětný tok výkonu a nedošlo k poškození hnacího stroje. Stupeň zpětné wattové ochrany měří jednofázový výkon mezi generátorem a energetickým systémem–sítí. Tento výkon je vyhodnocen z fázových proudů  $I_{L1}$  ( $I_U$ ) a  $I_{L2}$  ( $I_V$ ) a ze sdruženého napětí  $U_{12}$  ( $U_{UV}$ ). Proudová informace je vytvořena jako součet fázových proudů. Popudová hodnota stupně se zpětnou wattovou funkcí  $P \leftarrow / P_n$  je definována v jednotkách jmenovitého výkonu ochrany (souboru ochran). Rozsah seřiditelnosti je  $-2,0$  až  $-20,0$  %. Pro testování je nastavena nejnižší možná hodnota, tj. 2% jmenovitého výkonu ochrany. Nastavená hodnota je zobrazována na displeji modulu. Čas působení stupně  $P \leftarrow$  je volen z rozsahu 1 až 10 s , je-li  $SG1/8=0$  a 10 až 100s , je-li  $SG1/8=1$ . Čas vypínacího signálu je nastaven  $t_p = 5s$ .

Po nastavení modulu ochrany je provedena simulace poruchového stavu. Generátor po roztočení a nabuzení na jmenovité napětí a frekvenci je přifázován na síť 400 V/50Hz.

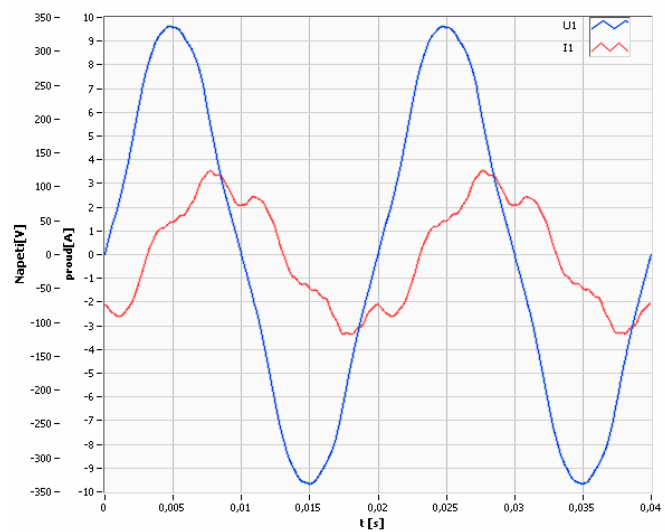
Velikost výkonu tekoucího do sítě regulujeme je regulována otáčkama poháněcího stroje. Hodnoty výkonu zobrazuje ochrana na displeji v procentech jmenovitého výkonu ochrany a to v rozsahu  $-25\%$  až  $25\%$ . Teče-li do sítě z generátoru (nebo naopak) výkon větší než 25% jmenovitého výkonu ochrany je zobrazováno na displeji ---. Po přifázování na síť generátor dodával do sítě výkon větší než 25% jmenovitého výkonu ochrany. Displej zobrazoval ---. Postupným snižováním výkonu hnacího motoru klesal výkon dodávaný do sítě na hodnotu, kterou již byla ochrana schopna zobrazit. Dalším snižováním výkonu pohonu byla dosažena hodnota  $-2\%$  (znaménko mínus je zobrazeno červeně-určuje motorický chod stroje). Ochrana reaguje, aktivace stupně je indikována žlutým světlem indikátoru působení. Po uplynutí doby působení  $t_p = 5s$  je generován vypínací signál na vypínací relé E, indikátor působení se rozsvítí červeně. Po zvýšení výkonu pohonu opět generátor dodává výkon do sítě, ochrana odpadá. Průběh okamžitých hodnot pro simulaci včetně fázorového diagramu sledovaného ustáleného stavu je zobrazen na obr. 3.12, efektivní hodnoty sledovaných veličin pak v tabulce 3.2. Podrobné vyhodnocení pro různé stavy provozu synchronního stroje obsahuje příloha P1.

SG 021 podbuzený motor

Fázorový diagram



Průběh okamžitých hodnot napětí a proudů jedné fáze



Obr. 3.12 Průběh okamžitých hodnot napětí a proudu jedné fáze, fázorový diagram sledovaného stavu působení zpětné wattové ochrany

Tab. 3.2 Vypočtené efektivní hodnoty pro sledovaný stav provozu synchronního stroje při testování modulu zpětné wattové ochrany

$U$ (V)	$I$ (A)	$S$ (VA)	$P$ (W)	$\varphi$ (°)
230,5	2,3	1575,6	759,2	60,0

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)
229,33	232,28	230,00

$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)
2,20	2,24	2,39

$S_1$ (VA)	$S_2$ (VA)	$S_3$ (VA)	$S$ (VA)
505,45	519,53	550,62	1575,60

$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$P_3$ (W)	$P$ (W)
239,07	273,32	246,83	759,22

kp1 (-)	kp2 (-)	kp3 (-)	kp (-)
0,47	0,53	0,45	0,48

fázové posuvy jednotlivých průběhů  $u$  a  $i$ 

329,71   209,98   92,54   268,87   152,82   30,45



$\varphi_1$ (°)	$\varphi_2$ (°)	$\varphi_3$ (°)
60,85	57,16	62,09

Test byl proveden na nejmenší možné hodnotě zpětného výkonu z důvodu možnosti poškození hnacího stroje při větším zpětném výkonu. Při větší hodnotě zpětného výkonu by začal generátor pohánět stejnosměrný motor a ten by vracel energii do obvodu buzení, které není schopno tuto energii rekuperovat (vrátit do sítě). Mohlo by dojít k poškození budícího obvodu. Malý zpětný tok výkonu nemůže poháněcí stroj poškodit. Tento výkon pouze kryje mechanické ztráty soustrojí (ztráty v ložiskách, ventilátoru).

Testování nadproudového stupně  $I>$  SPCJ3C3 proběhlo opět pro stav, kdy je synchronní generátor přifázován k síti. Obvod pro testování byl zapojen dle obr. 3.10. Nadproudová ochrana obsahuje nadproudový stupeň  $I>$  s volitelnou nezávislou nebo inverzní charakteristikou, zkratový stupeň  $I>>$  s rozsahem nastavení (2,5 až 20)  $I_N$  nebo (0,5 až 4)  $I_N$ . Zkratový stupeň může být vyřazen z činnosti. Oba nadproudové stupně mohou být blokovány externími řídicími signály z jiných ochran. Dále ochrana obsahuje digitální displej měřených a nastavovaných hodnot a hodnot zaznamenaných v okamžiku poruchy.

*Pozn.: Popis funkce (detailní informace viz. katalog výrobce firmy ABB)*

Nadproudová ochrana může pracovat jako 1fázová, 2fázová nebo 3fázová. Nadproudový nebo zkratový stupeň startuje, jestliže proud některé fáze překročí jeho nastavenou hodnotu. Když restartuje, vygeneruje startovací signál (SS1 nebo SS2), současně se rozsvítí jeho žlutý indikátor. Pokud doba zvýšení proudu trvá tak dlouho, že překročí nastavené zpoždění, aktivuje stupeň, který nastartuje vypnutí vypínače signálem (TS1 nebo TS2). Současně se rozsvítí červený indikátor stupně, který je v činnosti. Indikátor svítí i po vynulování stupně, indikátor se odstaví tlačítkem RESET. Působení nadproudového stupně  $I>$  může být blokováno přivedením blokovacího signálu BTS1. Podobně je i možné blokovat činnost zkratového stupně  $I>>$  blokovacím signálem BTS2. Blokování je programováno spínací skupinou SGB na desce plošných spojů modulu. Když ochrana napáječe obsahuje modul AOZ (automatické opětné zapínání), je spínací skupina SGB použita pro výběr startovacích signálů pro AOZ. Nadproudový stupeň může pracovat buď s nezávislou nebo inverzní charakteristikou. Charakteristika se volí spínačem SG 1/3. V časově nezávislém režimu je možno volit čas zpoždění stupně  $I>$  v jednom ze tří rozsahů, podle nastavení spínačů SG 1/1 a SG 1/2. Při použití inverzní charakteristiky (IDMT) jsou k dispozici čtyři charakteristiky čas / proud s různými stupni inverze. Zpoždění zkratového stupně  $I>>$  je nastavitelné samostatně ve třech rozsazích. Rozsahy se volí spínači SG 1/7 a SG 1/8. Činnost obou těchto stupňů je doplněna paměťovou funkcí (spínač SG 1/4), která udržuje aktivovaný vypínací výstup, i když příčina jeho aktivace zmizela. Resetování se provede současným stisknutím tlačítka STEP a RESET. Nastavenou hodnotu zkratového stupně  $I>>$  je možno automaticky zdvojit při připojení chráněného objektu (tzv. startovací situace) takže nastavená hodnota zkratového stupně může být nižší než zapínací proud a programuje se spínačem SG 1/5. Startovací situace je definována jako situace, kdy proud fáze vzroste z hodnoty 0,12  $I>$  na hodnotu vyšší než 3,0  $I>$  dříve než 60 ms. Startovací situace končí, když proud fáze poklesne pod 2,0  $I>$ . Rozsah

nastavení zkratovacího stupně se volí spínačem SG 1/6. K dispozici jsou dva rozsahy: (2,5 až 20)  $I_N$  a (0,5 až 4,0)  $I_N$ . Na nižším rozsahu obsahuje modul dva téměř shodné operační stupně. V tomto případě může být modul 3C3 použit jako dvoustupňové odlehčení od zátěže. Činnost zkratového stupně může být blokována nastavením jeho startovací hodnoty na nekonečno.

Nastavení popudových hodnot bylo provedeno s ohledem na namáhání statorového vinutí synchronního stroje velkým proudem. Byl zvolen časově nezávislý režim s nastavením  $SG1/1=SG1/2=SG1/3=0$ . Odpovídající rozsah časového působení je 0,05 až 1,00 s. Dále spínače  $SG1/4=1$  a  $SG1/5=0$  viz manuál ABB.

Pro převod PTP 20/1 a nastavení popudové hodnoty  $I>/I_n$  na nejnižší možnou hodnotu 0,47, odpovídá této hodnotě na primární straně PTP2 hodnota proudu statorovým vinutím synchronního generátoru

$$I_1 = \frac{I>}{I_n} \cdot I_n \cdot p = 0,47 \cdot 1 \cdot 20 = 9,4 \text{ A} \quad (3.1)$$

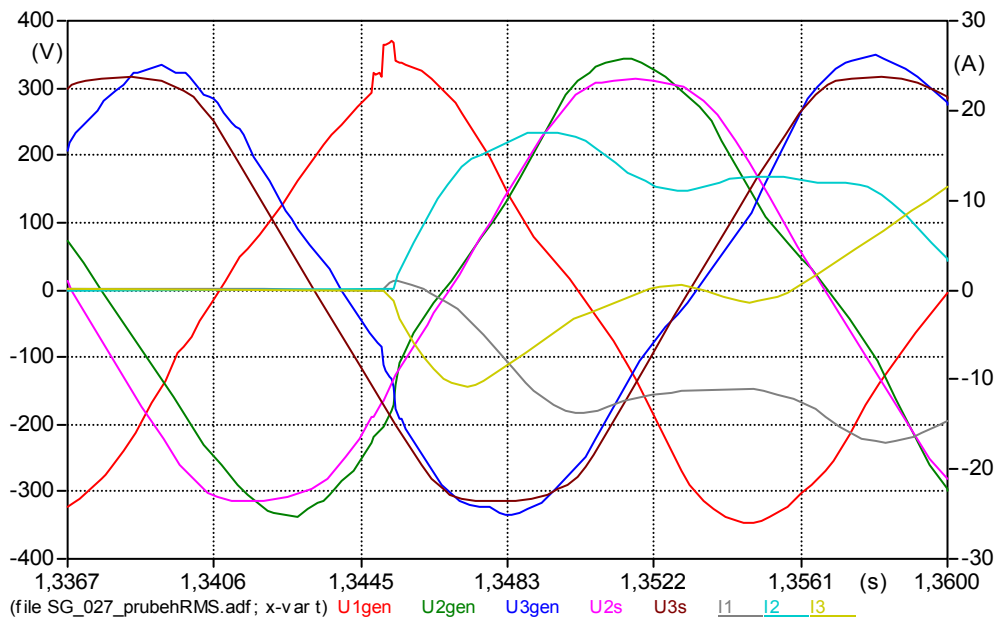
nastavená hodnota se zobrazuje na displeji modulu.

kde  $I>/I_n$  nastavená popudová hodnota ochrany stupně  $I>$ ,  
 $I_n$  jmenovitý proud ochrany  $I_n=1$  A podle použitých vstupů nadproudového modulu,  
 $p$  převod PTP 2 = 20/1 A ,  
 $I_1$  fázový statorový proud na primární straně PTP 2.

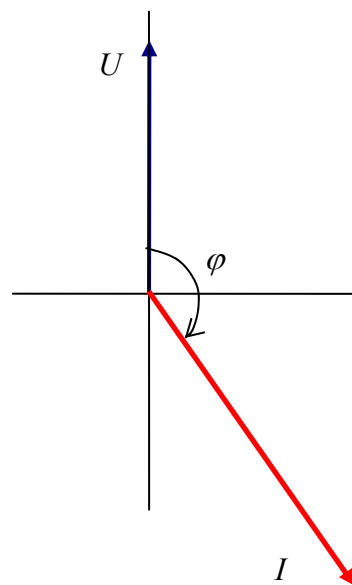
Čas působení nadproudového stupně  $I>$  je nastaven na  $t> = 0,4$ s.

Rozsah popudového článku stupně  $I>>$  byl nastaven na nekonečno, vypínací signál tohoto stupně byl tedy blokován.

Nadproudový stupeň  $I>$  reagoval přesně na nastavené popudové hodnotě  $I>/I_n=0,47$  , čili při statorovém proudu tekoucím do sítě 9,4A, a to celkem 52x, což bylo způsobeno poklesem efektivní hodnoty sledovaného proudu a následnému resetování časovače časově nezávislého zpoždění v důsledku odeznívání přechodného děje při přifázování. (V důsledku setrvačných hmot generátoru je v okamžiku přifázování rotor generátoru přibrzdován, popř. urychlován, čemuž odpovídá i okamžitý průběh proudu statorovým vinutím). Popud stupně byl indikován žlutým světlem indikátoru působení  $I>$ . Po uplynutí nastaveného času  $t> = 0,4$ s byl generován vypínací signál na výstupní relé B (slyšitelné je sepnutí relé) a indikátor působení svítil červeným světlem, generátor byl odpojen od sítě. Průběhy okamžitých hodnot napětí proudů v okamžiku přifázování jsou zobrazeny na obr. 3.13, průběhy proudů od okamžiku přifázování do okamžiku odpojení generátoru od sítě vypínacím signálem nadproudového stupně ochran SPCJ3C3 na obr. 3.14, efektivní a okamžitá hodnota proudu statorovým vinutím pro měřený děj reakce ochrany na obr. 3.15.



Obr. 3.13 Okamžité průběhy veličin v okamžiku přifázování



Obr. 3.13a Fázorový diagram pro sledovaný děj při testování nadproudového stupně SPCJ3C3

Tab. 3.3 Vypočtené efektivní hodnoty pro sledovaný stav provozu synchronního stroje při testování modulu nadproudového stupně SPCJ3C3

$U$ (V)	$I$ (A)	$S$ (VA)	$P$ (W)	$\varphi$ (°)
232,8	9,45	6599,76	-5361,46	145,43

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)
231,79	234,59	232,01

$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)
9,48	9,41	9,45

$S_1$ (VA)	$S_2$ (VA)	$S_3$ (VA)	$S$ (VA)
2198,06	2208,23	2193,47	6599,76

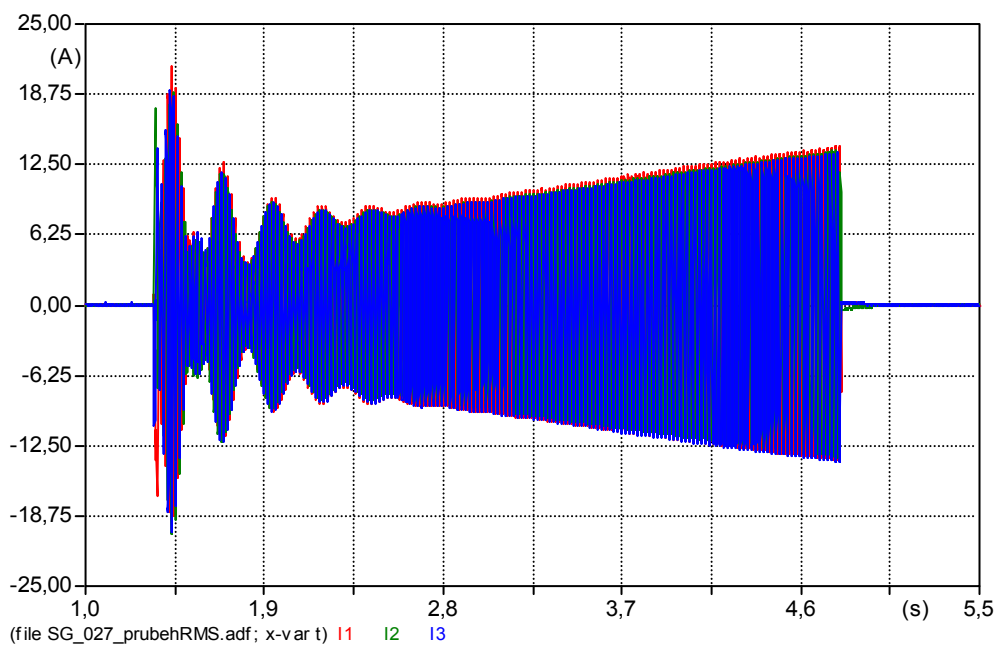
$P_1$ (W)	$P_2$ (W)	$P_3$ (W)	$P$ (W)
-1764,85	-1780,71	-1815,90	-5361,46

kp1 (-)	kp2 (-)	kp3 (-)	kp (-)
-0,80	-0,81	-0,83	-0,81

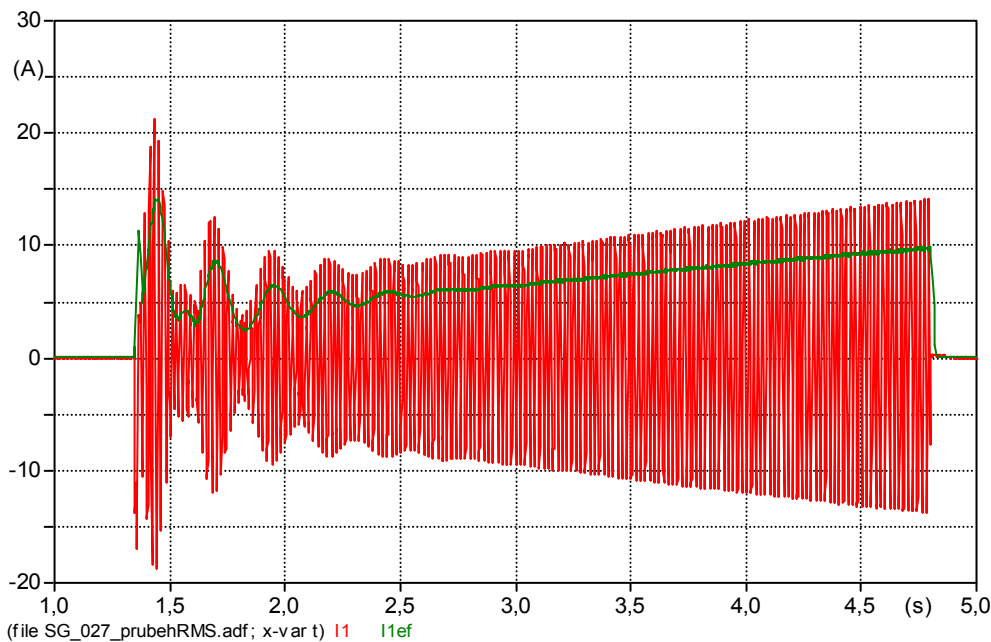
fázové posuvy jednotlivých průběhů  $u$  a  $i$

346,45    226,82    109,24    200,86    82,04    323,33

$\varphi_1$ (°)	$\varphi_2$ (°)	$\varphi_3$ (°)
145,59	144,78	145,91



Obr. 3.14 Průběhy proudů od okamžiku přifázování do okamžiku odpojení generátoru od sítě vypínacím signálem nadproudového stupně ochran SPCJ3C3

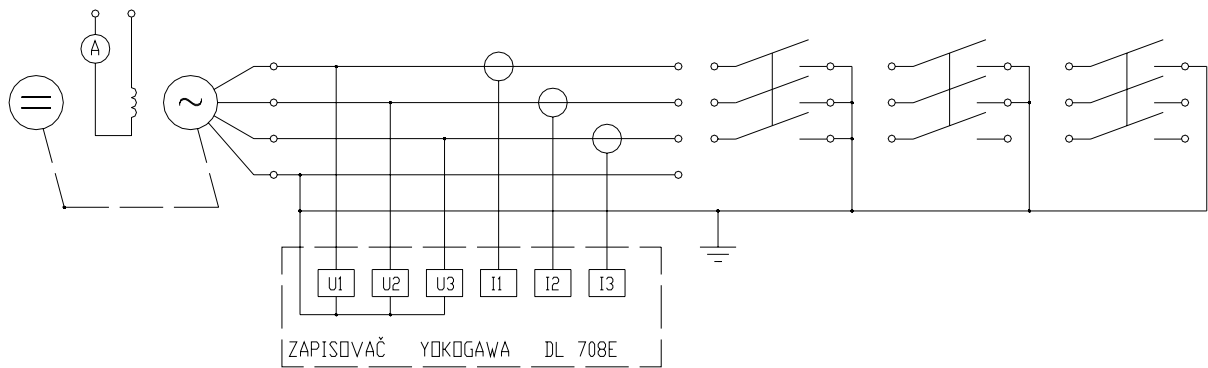


Obr. 3.15 Efektivní a okamžitá hodnota proudu statorovým vinutím pro měřený děj reakce ochrany

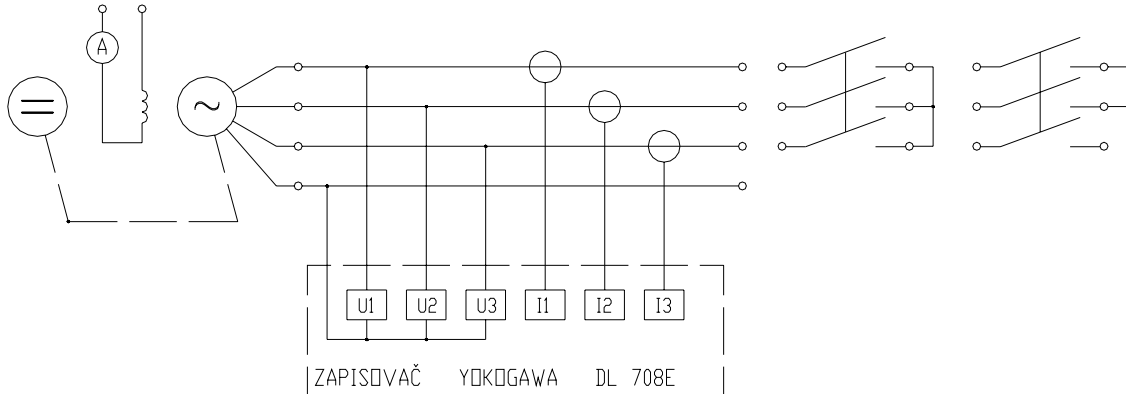
### 3.2.2 Měření zkratů a zemních zkratů na svorkách synchronního generátoru, testování modulu nadproudové ochrany zkratového stupně I>> SPCJ 3C3

Při trvalém zkratovém proudu je magnetický tok jen asi 8 až 15% plného magnetického toku při zatížení a jmenovitém napětí (normální stav). K této změně nedojde okamžitě- skokem, neboť tomu brání časová změna magnetického toku, která indukuje ve statorovém (kotevním) i rotorovém (budícím) vinutí proudy, které této změně toku brání. Proto v okamžiku zkratu – zkrat na svorkách alternátoru- vznikají velké zkratové proudy ve všech vinutích, tj. kotevním, budícím i tlumícím. Zkratový proud může mnohonásobně převyšovat jmenovitý proud a k hodnotě ustáleného zkratového proudu klesne teprve na konci přechodového jevu.

Testování modulu nadproudové ochrany zkratového stupně I>> bylo provedeno pro simulaci 3fázových, 2fázových zkratů a 3fázových, 2fázových a 1fázových zemních zkratů na svorkách generátoru. V následujícím textu je uvedena ukázka testování ochrany pro případ vzniku 3fázového zemního zkratu na svorkách generátoru, ostatní vyhodnocení měření pro další poruchové stavy, obsahuje příloha P1. Zapojení vstupních svorek ochrany odpovídá zapojení na obr. 2. 10, schéma zapojení experimentu je zobrazeno na obr. 3.16.

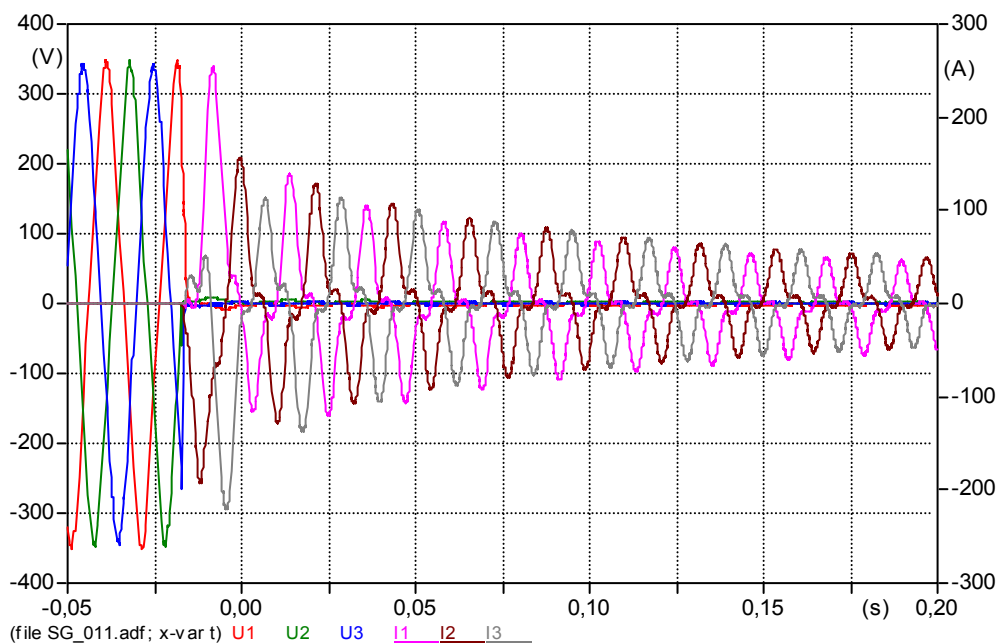


Obr. 3.16a Měření zemních zkratů na svorkách synchronního generátoru



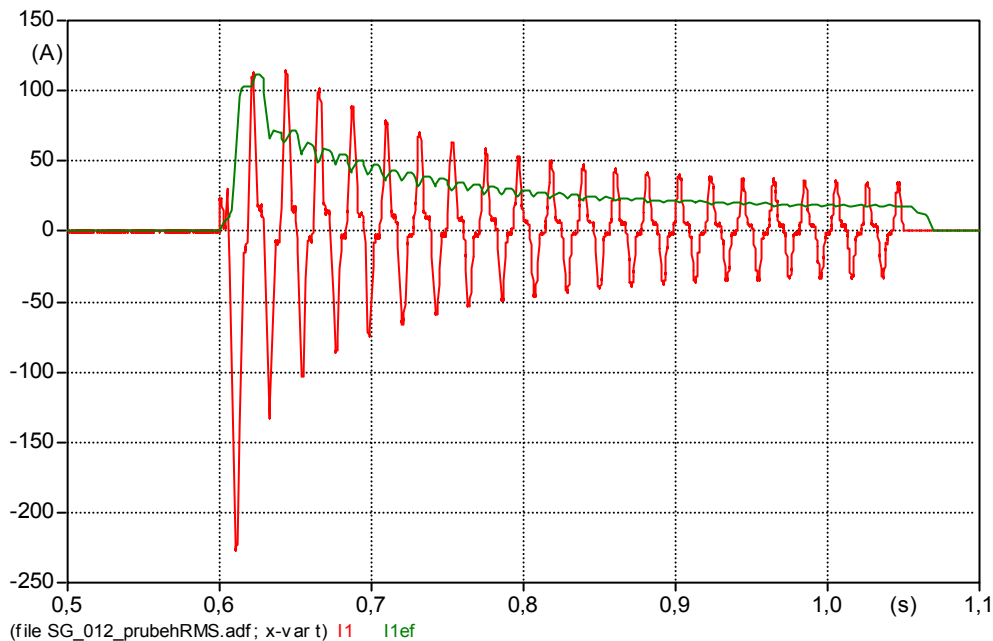
Obr. 3.16b Měření zkratů na svorkách synchronního generátoru

Startovací hodnota popudového stupně  $I_{>>}$  byla nastavena na hodnotu 0,5, čemuž odpovídá velikost proudu statorovým vinutím 10A, čas vypnutí ochrany byl zvolen 0,5s. Čas vypnutí nadproudového stupně  $I_{>}$  byl nastaven na nejvyšší možnou hodnotu, tedy 105s z důvodu jeho blokování.



Obr. 2.17 Průběh okamžitých hodnot napětí a proudů v okamžiku vzniku 3fázového zemního zkratu

Na obr. 3.18 je zobrazen průběh efektivní hodnoty sledovaného proudu statorovým vinutím generátoru v okamžiku vzniku 3fázového zemního zkratu do okamžiku vypnutí zkratu vypínacím signálem zkratového stupně ochrany SPCJ3C3.

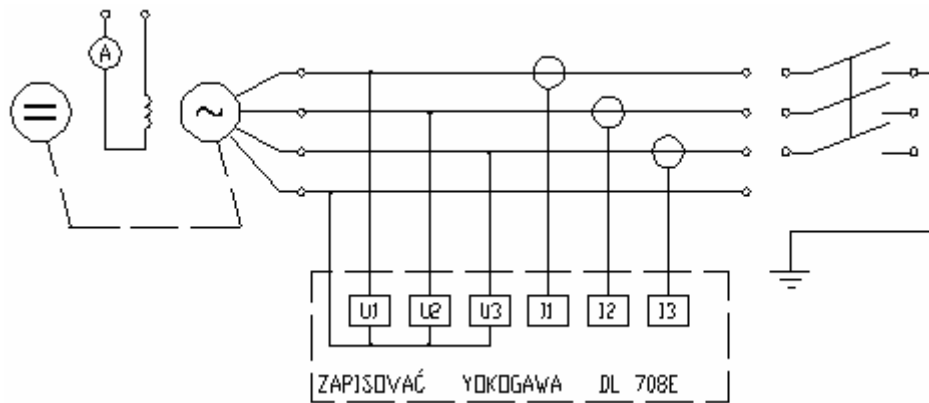


Obr. 3.18 Průběh zkratového proudu a jeho efektivní hodnota (okamžik vzniku a následného vypnutí zkratu vypínacím signálem zkratového stupně ochrany SPCJ3C3)

Ochrana startovala při nastaveném proudu 10 A a zkrat byl vypnut dle nastavení za časový interval 0,5 s.

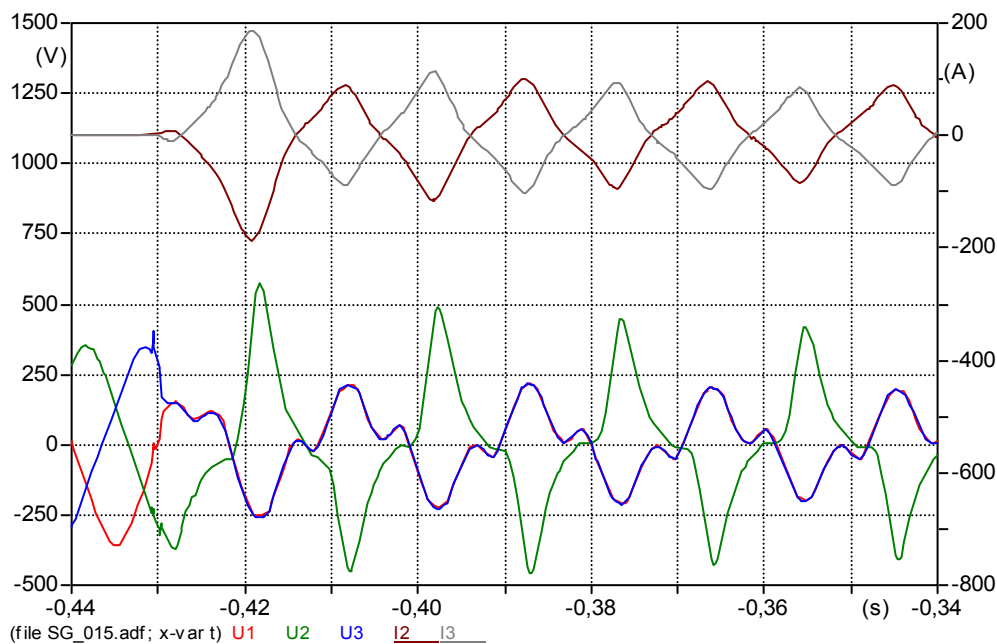
### 3.2.3 Měření zemního spojení statoru synchronního generátoru, testování modulu směrové zemní ochrany SPCS 3C4

Zemní spojení statoru je porucha, která nemusí být tak nebezpečná jako např. zkrat. To platí samozřejmě za předpokladu, že zemní spojení je včas zjištěno a nedojde dlouhotrvajícím zemním proudem k přílišnému poškození. Proto je citlivá a selektivní zemní ochrana velmi důležitým prvkem souboru ochran generátoru. Při nastavování nadproudové nebo přepětové ochrany je možno nastavit popudovou hodnotu tak, aby např. odpovídala jmenovitému proudu resp. napětí generátoru. V případě nastavování modulu směrové zemní ochrany je však poměrně obtížné definovat velikosti zemních proudů a napětí, které mohou vzniknout při vzniku zemního spojení. Velikosti zemního proudu a napětí nemusí být dostatečně velké a nestačí k popudu ochrany. Proto volíme nejmenší možné velikosti popudových hodnot  $I_{\phi >}$ ,  $I_{\phi >>}$  a  $U_{\phi >}$ . Zapojení modulu SPCS 3C4 bylo provedeno dle schématu na obr. 3.10, simulace 1fázového zemního spojení statoru synchronního generátoru byla zapojena dle obr. 3.19.



Obr. 3.19 Simulace 1fázového zemního spojení statoru synchronního generátoru

Pomocí spínačů SG1/2 a SG1/3 přepínákové skupiny na čelním panelu modulu zemní směrové ochrany, je zvolena provozní charakteristika ochrany ( $I_0 \cdot \sin \varphi$ ,  $I_0 \cdot \cos \varphi$ )  $I_0 \cdot \cos \varphi$  nastavením SG1/2=SG1/3=0. Seřizovacím prvkem popudové hodnoty  $I_{\varphi} > / I_n$  (%) je nastaven stupeň na 1% jmenovitého proudu ochrany. Čas působení stupně  $I_{\varphi} >$  je zvolen  $t > = 1$ s. Hodnota popudu nulového napětí  $U_0 >$  je nastavena na nejmenší hodnotu  $U_0 > / U_n = 2\%$ . Generátor byl roztočen na synchronní otáčky a nabuzen. Při proudu místem zemního spojení 2,5A dosáhla hodnota nulového napětí 2% jmenovitého napětí ochrany a došlo k aktivaci obou stupňů zemní směrové ochrany. Po uplynutí nastaveného času došlo k rozsvícení červeného indikátoru působení stupně  $I_{\varphi} >$  a byl generován vypínací signál na výstupní relé F. Naměřené údaje ochranou byly  $I_0 = 13,7$  %,  $I_{\varphi} = 0,8$  ,  $U_0 = 2,1$  %. Na obr. 3.20 je na ukázkou zobrazen průběh okamžitých veličin napětí a proudu v okamžiku vzniku 2fázového zemního spojení statoru synchronního generátoru 12,5kVA.



Obr. 3.20 Průběh okamžitých veličin napětí a proudu v okamžiku vzniku 2fázového zemního spojení statoru synchronního generátoru



### 3.2.4 Simulace provozních a poruchových stavů synchronního generátoru s využitím programu EMTP-ATP

Matematický model soustrojí motor-generátor byl v programu ETMTP-ATP vytvořen v rámci předchozího grantu FRVŠ, výsledky matematického modelování jsou k dispozici na stránkách řešitele <http://homen.vsb.cz/~mis029>, v části „Laboratoř ochran“. V rámci stávajícího řešení grantu FRVŠ 2359/2005 byla provedena verifikace modelu měřením provozních a poruchových stavů, výsledky měření obsahuje příloha P1.

#### Literatura

(4) Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, Praha 1991